

# Obtención del mapa de rendimiento georreferenciado del cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) CCN-51 mediante el empleo de técnicas de agricultura de precisión

*Georeferenced yield mapping of cocoa crop (*Theobroma cacao* L.) CCN-51 using precision agriculture techniques*

- <sup>1</sup> Erick Alberto Eguez Enriquez  <https://orcid.org/0000-0002-7071-4645>  
Universidad Técnica Estatal de Quevedo (UTEQ), Quevedo, Ecuador.  
Magister Scientiae en Producción Vegetal  
[eequez@uteq.edu.ec](mailto:eequez@uteq.edu.ec)
- <sup>2</sup> Edwin Miguel Jiménez Romero  <https://orcid.org/0000-0002-7411-8189>  
Universidad Técnica Estatal de Quevedo (UTEQ), Quevedo, Ecuador.  
Magister en Manejo y Aprovechamiento Forestal  
[ejimenez@uteq.edu.ec](mailto:ejimenez@uteq.edu.ec)
- <sup>3</sup> Oscar Oswaldo Prieto Benavides  <https://orcid.org/0000-0003-4101-0523>  
Universidad Técnica Estatal de Quevedo (UTEQ), Quevedo, Ecuador.  
Doctor en Recursos Naturales  
[oprieto@uteq.edu.ec](mailto:oprieto@uteq.edu.ec)
- <sup>4</sup> Anyela Nayeli Cedeño Cedeño  <https://orcid.org/0009-0008-7192-010X>  
Universidad Técnica Estatal de Quevedo (UTEQ), Quevedo, Ecuador.  
[acedenoc8@uteq.edu.ec](mailto:acedenoc8@uteq.edu.ec)



## Artículo de Investigación Científica y Tecnológica

Enviado: 12/04/2025

Revisado: 10/05/2025

Aceptado: 30/06/2025

Publicado: 28/07/2025

DOI: <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v9i3.1.3376>

Cítese:

Eguez Enriquez, E., Jiménez Romero, E. M., Prieto Benavides, O. O., & Cedeño Cedeño, A. N. (2025). Obtención del mapa de rendimiento georreferenciado del cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) CCN-51 mediante el empleo de técnicas de agricultura de precisión. *Ciencia Digital*, 9(3.1), 27-44.  
<https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v9i3.1.3376>



CIENCIA DIGITAL, es una revista multidisciplinaria, trimestral, que se publicará en soporte electrónico tiene como misión contribuir a la formación de profesionales competentes con visión humanística y crítica que sean capaces de exponer sus resultados investigativos y científicos en la misma medida que se promueva mediante su intervención cambios positivos en la sociedad. <https://cienciadigital.org>  
La revista es editada por la Editorial Ciencia Digital (Editorial de prestigio registrada en la Cámara Ecuatoriana de Libro con No de Afiliación 663) [www.celibro.org.ec](http://www.celibro.org.ec)



Esta revista está protegida bajo una licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Copia de la licencia: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

**Palabras claves:**

Producción,  
monilla, fitoftoria,  
geoestadística,  
espacial.

**Keywords:**

Production, frosty  
pod rot,

**Resumen**

**Introducción:** La Agricultura de Precisión optimiza el uso de insumos, aprovechando la variabilidad espacial y temporal que existe dentro de los cultivos tanto para suelo, productividad, plagas y enfermedades. Su implementación en frutales perennes representa un desafío debido a la estimación de rendimiento. En cultivos de cacao la variabilidad en la productividad es significativa, afectando la eficiencia del manejo agrícola. Aunque existen estudios sobre interpolación en cultivos de ciclo corto, se requiere un enfoque específico para frutales perennes. **Objetivo:** Este estudio busca validar un método que mapee la variabilidad espacial del rendimiento de cacao CCN-51 en sistemas de cosecha manual. **Metodología:** El área experimental cuenta con una superficie de 3000 m<sup>2</sup>, con plantas injertadas de 7 años. Para el muestreo, el área se dividió en 36 celdas regulares de 30 m x 30 m. Durante la cosecha de marzo a junio, se recolectaron mazorcas quincenalmente y se georreferenciaron con GPS, utilizando el sistema UTM y la aplicación Mobile Topographer. Los análisis estadísticos se realizaron con GS+ y QGIS 3.10, aplicando interpolación mediante kriging o el inverso de la distancia, según la dependencia espacial. **Resultados:** El estudio del cacao CCN-51 mostró variabilidad mensual en la producción. Las enfermedades, como monilla y mazorca negra, aumentaron a lo largo del tiempo. La geoestadística reveló que tanto el modelo gaussiano como el esférico fueron adecuados para describir la dependencia espacial de las mazorcas sanas, enfermas y del peso seco, con una alta dependencia espacial en la mayoría de los meses. La interpolación mediante kriging permitió identificar áreas específicas de alta y baja producción, mostrando que las zonas suroeste y central fueron las más productivas o afectadas según el mes. **Conclusión:** El método propuesto permite optimizar la gestión del cultivo de cacao, aumentando la precisión en el uso de recursos y mejorando la sostenibilidad en sistemas agrícolas perennes. **Área de estudio general:** Agronomía **Área de estudio específica:** Agricultura de precisión **Tipo de estudio:** Artículos originales.

**Abstract**

**Introduction:** Precision Agriculture optimizes input use by leveraging the spatial and temporal variability present within

Phytophthora,  
geostatistics,  
spatial.

crops, including soil, productivity, pests, and diseases. Its implementation in perennial fruit trees represents a challenge due to yield estimation. In cacao crops, variability in productivity is significant, affecting the efficiency of agricultural management. Although studies on interpolation exist for short-cycle crops, a specific approach is required for perennial fruit trees. **Objective:** This study aims to validate a method for mapping the spatial variability of CCN-51 cacao yield in manual harvest systems. **Methodology:** The experimental area covers 3000 m<sup>2</sup>, with 7-year-old grafted plants. For sampling, the area was divided into 36 regular cells of 30 m x 30 m. During the harvest from March to June, pods were collected biweekly and georeferenced using GPS, employing the UTM system and the Mobile Topographer app. Statistical analyses were performed with GS+ and QGIS 3.10, applying interpolation through kriging or inverse distance weighting, depending on spatial dependence. **Results:** The study of CCN-51 cacao showed monthly variability in production. Diseases such as frosty pod rot and black pod increased over time. Geostatistical analysis revealed that both the Gaussian and spherical models were suitable to describe the spatial dependence of healthy pods, diseased pods, and dry weight, with high spatial dependence in most months. Kriging interpolation allowed the identification of specific areas of high and low production, showing that the southwest and central zones were the most productive or affected depending on the month. **Conclusion:** The proposed method allows for optimizing cacao crop management, increasing resource use efficiency, and improving sustainability in perennial agricultural systems. **General Area of Study:** Agronomy. **Specific area of study:** Precision agriculture. **Type of study:** Original articles.

## 1. Introducción

La Agricultura de Precisión (AP) ha sido adoptada ampliamente en el mundo, especialmente en cultivos de ciclo corto, como los de granos. Los agricultores recurren a esta metodología debido a la necesidad de abordar la heterogeneidad que presenta el campo. Existen variaciones tanto temporales como espaciales en factores clave como el

clima, el suelo, la aplicación de fertilizantes, la presencia de plagas y enfermedades (Talaat, 2023).

El establecimiento de zonas de manejo específicas dentro de los cultivos, basadas en características particulares, permite determinar el potencial de rendimiento en cada área. Para ello, se utilizan bases de datos que combinan mapas de propiedades físicas del suelo, relieve, rendimiento histórico, entre otros factores. La AP facilita que los agricultores tomen decisiones más informadas y adaptadas a las condiciones de cada sitio, optimizando así el uso de recursos y mejorando la eficiencia productiva (Kumar et al., 2022).

El monitoreo de la producción es una de las actividades más importantes en la AP, ya que proporciona información clave sobre el rendimiento en distintas zonas del cultivo. Este análisis permite implementar estrategias de manejo diferenciadas para optimizar la productividad en cada área. En muchos casos, la cosecha es mecanizada, y los datos que conforman los mapas de rendimiento provienen directamente de sensores instalados en las cosechadoras, lo que garantiza una recopilación precisa y eficiente de la información (Colaço et al., 2020; Ota et al., 2019).

El rendimiento en árboles frutales, especialmente en cultivos como el cacao, el café y los cítricos, es uno de los aspectos más complejos de la AP, debido a la limitada disponibilidad de métodos efectivos. Los investigadores han intentado desarrollar técnicas para estimar la producción de frutos por planta, utilizando el conteo de frutos en secciones de la copa de los árboles. Sin embargo, este método presenta limitaciones, ya que la estructura de ramificación y la fructificación varían tanto entre especies como entre cultivares de la misma especie, dificultando una estimación precisa del rendimiento (Triboni & Barbosa, 2004).

En São Paulo, Brasil, se evaluó la variabilidad espacial en la productividad y el tamaño de los frutos de naranja, aplicando técnicas de geoestadística. A través de datos obtenidos en distintos puntos de las parcelas donde la cosecha se almacena temporalmente en algún tipo de contenedor. Posteriormente, se realizó una interpolación para generar mapas detallados de productividad. Este análisis permitió identificar áreas de alta y baja productividad dentro de los cultivos (Molin et al., 2012; Molin & Mascarín, 2007). De manera similar, en la región amazónica del noreste de Pará en Brasil, y en el departamento de Casanare en Colombia, se llevaron a cabo estudios para mapear la productividad del cacao mediante el uso del interpolador Kriging y datos georreferenciados de cada planta. Estos análisis permitieron identificar puntos específicos con un mayor número de frutos y un índice de peso más alto. La aplicación de la geoestadística mostró ser una herramienta eficiente para evaluar la variabilidad espacial de la producción (Furtado & Oliveira, 2019; Molin et al., 2012).

Es importante establecer nuevas técnicas para la generación de mapas de productividad en especies perennes para adoptar estrategias de georreferenciamiento efectivas. Esto permitirá al agricultor visualizar, mediante imágenes, el estado actual de su cultivo y abordar de manera oportuna problemas relacionados con plagas, enfermedades o deficiencias nutricionales en el cultivo, contribuyendo así a mejorar los rendimientos.

El objetivo de este estudio es desarrollar y validar un método para mapear la variabilidad en el rendimiento del cultivo de cacao CCN-51 (*Theobroma cacao* L.), utilizando técnicas de AP que sean simples, eficientes y compatibles con los sistemas existentes de cosecha manual.

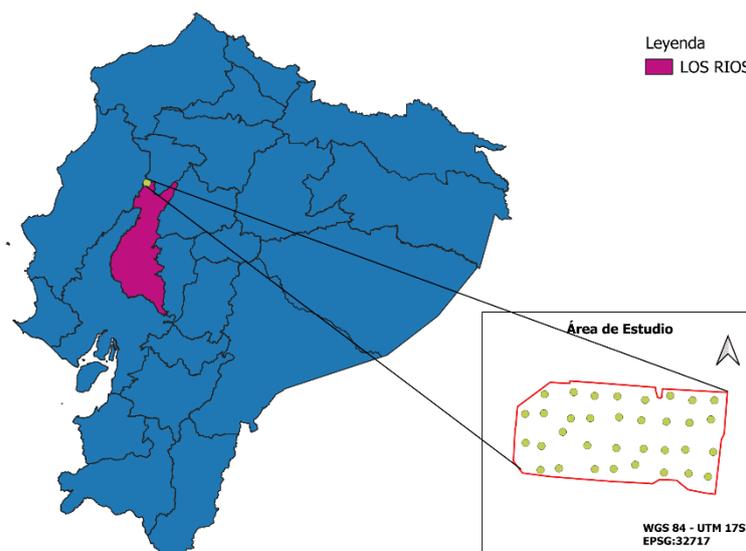
## 2. Metodología

### Caracterización del área

El área experimental se encuentra en las coordenadas geográficas: 00° 33' 08.2" de latitud Sur, 79° 26' 48.5" de longitud Oeste de Greenwich, a una altitud de 160 m (sede de la finca), ubicada en el cantón Buena Fe, en la provincia de Los Ríos (Figura 1). El suelo del área es un Andisol y de textura franca. La finca tiene una superficie de plantación de 3000 m<sup>2</sup> con plantas de cacao CCN-51 (*Theobroma cacao* L.) injertadas, de 7 años, con un espaciamiento de 3 m x 3 m y un total de 3290 plantas.

**Figura 1**

*Localización geográfica del área de estudio y distribución de los puntos muestrales*



El área se dividió en subparcelas utilizando un muestreo en celdas regulares de 30 m x 30 m aproximadamente, es decir, con una configuración de 36 pequeñas celdas.

Las coordenadas utilizadas en el trabajo se transformaron al sistema UTM (Universal Transversa de Mercator), siguiendo el sistema de coordenadas rectangulares. Este sistema de coordenadas establece la división de la Tierra en 60 husos de 6° cada uno.

### Muestreo en cuadrícula

Durante la cosecha, entre los meses de marzo, abril, mayo y junio, se realizaron recolecciones quincenales de mazorcas maduras, evaluando tanto mazorcas sanas como mazorcas enfermas en cada celda de la parcela experimental. Estas fueron abiertas para extraer las almendras frescas, las cuales se colocaron en sacos distribuidos en cada celda de la parcela experimental. El método descrito por (Molin & Mascarín, 2007) se utilizó para generar el mapa de rendimiento, basado en la georreferenciación de sacos y en el cálculo del rendimiento en estos puntos. Para calcular el rendimiento, fue necesario conocer la masa de fruta en cada saco y el área que esta representaba en el campo. Después de la interpolación, el punto de rendimiento (kg/ha) formó la superficie del mapa de rendimiento.

Los sacos fueron georeferenciados con un receptor GPS utilizando la aplicación Mobile Topographer, instalada en un celular Hisilicon Kirin 710 Huawei. El área representativa de cada saco se obtuvo multiplicando el ancho de la franja de cosecha (30 m) por la mitad de la distancia entre puntos vecinos. Para esto, las coordenadas geográficas se convirtieron a coordenadas métricas (UTM) para calcular las distancias entre los sacos usando el teorema de Pitágoras.

### Tratamiento de los Datos

El análisis inicial se fundamentó en estadísticas descriptivas, considerando valores de tendencia central, dispersión y coeficiente de variación, para cada variable.

Para evaluar la estructura espacial de las variables mazorcas sanas, mazorcas enfermas y peso seco de cacao por hectárea se utilizó el software GS+ Geostatistics for the Environmental Sciences versión 10.0 (Robertson, 2008), se calculó el semivariograma el cual representa la relación entre los lags (espacios) del intervalo de muestreo y la semivarianza (Swan, 1998). Teóricamente, un semivariograma puede ser calculado según la Ecuación 1.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

donde:  $\gamma(h)$  es la semivarianza en función de la distancia,  $Z(x_i)$  representa el valor de la variable en el punto  $i$ ;  $Z(x_i+h)$  el valor de la variable en el punto  $x_i + h$ ,  $N(h)$  es el número de veces que dos puntos distintos están separados por una misma distancia  $h$ .

Para calcular el desempeño del método muestral, se utilizó el método de validación cruzada *leave-one-out*, que consiste en remover un punto del conjunto de datos, estimar su valor mediante el método de muestro, y luego reincorporarlo al conjunto para repetir el proceso con el siguiente punto, hasta completar todos los puntos del conjunto de datos. Una vez obtenidos los valores observados y estimados. Se calculó el error cuadrático medio (RMSE), para las variables en estudio, conforme la Ecuación 2.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2} \quad (2)$$

donde:  $\hat{x}_i$  representa el valor estimado de la variable en el punto  $i$ ;  $x_i$  es el valor observado de la variable en el punto  $i$ ; y  $n$  el número de puntos muestreados.

La estimación del punto removido se realizó mediante kriging ordinario, tras ajustar el semivariograma de cada variable. Los modelos de semivariogramas que se evaluaron fueron el exponencial, esférico, gaussiano y lineal, eligiendo el modelo con mayor coeficiente de determinación ( $r^2$ ). A partir de cada modelo ajustado, se obtuvieron los parámetros Co, Co+C y el índice de dependencia espacial (Hamman et al., 2022).

Todo el análisis geoestadístico se realizó utilizando herramientas de geoprocamiento de QGIS. Para la interpolación y generación de los mapas temáticos, se utilizó el método inverso de la distancia (cuando la dependencia espacial fuera baja) o kriging para lo cual se utilizó el plugin *Smart-Map*. El plugin es un complemento para el software QGIS (QGIS development Team, 2018) versión 3.10 o superior desarrollado en Python (creado por Guido Van Rossum y gerenciado Por Python Software Foundation, Delaware, EUA). *Smart-Map* está disponible en GitHub o puede ser instalado desde el repositorio de plugins de QGIS (Pereira et al., 2022).

### 3. Resultados y discusión

#### Estadística descriptiva

Los datos de cosecha de mazorcas sanas y enfermas, así como el peso seco en kilogramos por hectárea (kg/ha) del cacao CCN-51, presentan una variabilidad notable entre los diferentes meses de evaluación (marzo, abril, mayo y junio), como se muestra en la Tabla 1.

La producción de mazorcas sanas varió significativamente a lo largo de los meses. Marzo mostró el promedio más alto de mazorcas sanas (5134.24), mientras que en junio se observó la menor producción promedio (2585.36). El coeficiente de variación (CV%) reflejó variabilidad considerable, con el valor más alto en junio (47.52%). La cantidad de mazorcas enfermas fue significativamente mayor en junio, con un promedio de 17810, en contraste con marzo, que presento el promedio más bajo con 7513.03. El CV% de las

mazorcas enfermas también fue alto, reflejando la variabilidad espacial en la distribución de enfermedades en los meses de marzo, mayo y junio, mientras que en abril se observó una baja dependencia espacial.

**Tabla 1**

*Estadística descriptiva de los datos de cosecha del cultivo CCN-51*

Mes	Descriptiva	Promedio	Des. Estándar	Varianza	Min	Max	CV%
Marzo	Mazorcas Sanas	5134.24	1662.75	2764723.19	2333.00	9111	32.39
	Mazorcas enfermas	7513.03	3741.61	13999648.21	2000.00	14444.00	49.80
	Peso seco kg/ha	590.46	261.09	68166.26	232.33	1303.00	44.22
Abril	Mazorcas Sanas	4960.29	1719.31	2956017.61	2333.00	8555.00	34.66
	Mazorcas enfermas	3299.27	829.31	687762.95	2222.00	5333.00	25.14
	Peso seco kg/ha	628.63	289.08	83570.11	262.67	1313.11	45.99
Mayo	Mazorcas Sanas	4365.50	1667.66	2781099.65	1666.00	8000.00	38.20
	Mazorcas enfermas	5508.00	3570.17	12746126.38	2111.00	15111.00	64.82
	Peso seco kg/ha	475.05	198.91	39563.40	141.33	969.67	41.87
Junio	Mazorcas Sanas	2585.36	1228.61	1509479.86	333.00	5555.00	47.52
	Mazorcas enfermas	17810.00	10527.06	110818953.76	3777.00	41666.00	59.11
	Peso seco kg/ha	252.23	138.86	19282.11	30.33	646.44	55.05

En cuanto al rendimiento de peso seco, el mes de abril mostró el promedio más alto con 628.63 kg/ha, mientras que en junio disminuyó considerablemente a 252.23 kg/ha. El coeficiente de variación para el peso seco fue alto en todos los meses, lo que indica una distribución no uniforme del rendimiento en el área de estudio.

A lo largo del tiempo, se observó una disminución en la producción de mazorcas sanas y rendimiento de cacao seco y un incremento en la cantidad de mazorcas enfermas. Esto se atribuye a la presencia de frutos infectados después de la fecundación de la flor, que coincidió con condiciones ambientales favorables para el desarrollo de patógenos. Estas condiciones propiciaron la proliferación de enfermedades durante las primeras doce semanas de desarrollo de los frutos, resultando en una pérdida significativa de mazorcas sanas, estimada entre el 60 y el 80% (Cubillos, 2023; Albores et al., 2022). Entre las principales enfermedades que afectaron la producción, se destacan la Monilla, causada

por *Moniliophthora roreri*, y la mazorca negra, causada por *Phytophthora spp.*. Estas patologías tuvieron un impacto considerable en la reducción de frutos sanos, limitando la productividad del cultivo de cacao (Anzules-Toala et al., 2021).

### Geoestadística

En la Tabla 2 se observa que para mazorcas sanas los modelos gaussiano y esférico se ajustaron mejor dependiendo del mes. Para marzo y mayo, el modelo gaussiano presentó el menor error cuadrático medio (RMSE), mientras que en abril y junio el modelo esférico fue el que mejor se ajustó. En términos de  $R^2$ , los valores estuvieron consistentemente altos (por encima de 0.95), lo que indica una buena precisión de los modelos en todos los meses. Los valores del índice de dependencia espacial (IDE) fueron altos, con un grado de dependencia clasificado como ALTA en cada caso, lo que resalta una fuerte estructura espacial en la distribución de las mazorcas sanas.

**Tabla 2**

*Parámetros de ajuste del semivariograma para la producción de mazorcas sanas de cacao CCN-51*

Mes	Nugget	Sill	Rango (m)	Modelo	RMSE	$R^2$	IDE (%)	Grado de dependencia
Marzo	1060000	5230000	275.40	Gaussiano	$4.83 \times 10^{10}$	0.98	79.73	ALTA
Abril	430000	3970000	252.10	Esférico	$1.27 \times 10^{11}$	0.95	89.17	ALTA
Mayo	490000	4090000	225.86	Gaussiano	$7.20 \times 10^{10}$	0.98	88.02	ALTA
Junio	356000	1563000	110.70	Esférico	$1.22 \times 10^{10}$	0.97	77.22	ALTA

RMSE = error cuadrático medio,  $R^2$  = coeficiente de determinación, IDE = índice de dependencia espacial

En general, el modelo gaussiano fue óptimo para los meses de marzo y mayo, mientras que el modelo esférico fue adecuado para abril y junio, lo que sugiere una variabilidad temporal en la estructura espacial de las mazorcas de cacao CCN-51.

La Tabla 3 muestra los parámetros de ajuste de los semivariogramas para la producción de mazorcas enfermas en el cultivo de cacao CCN-51. Los resultados muestran que, en los meses de marzo y mayo, el modelo esférico ofreció el mejor ajuste, evidenciado por un RMSE bajo y valores de  $R^2$  elevados (0.98 y 0.995, respectivamente), lo que indica una buena precisión del modelo. En contraste, para el mes de abril, el modelo lineal mostró el menor RMSE, pero su valor de  $R^2$  (0.881) fue menor en comparación con los otros meses, lo que se traduce en una menor dependencia espacial, reflejada también en el IDE del 0%, lo cual implica baja dependencia espacial lo que sugiere una mayor aleatoriedad en la distribución de las mazorcas enfermas.

Para junio, el modelo gaussiano fue el que mejor se ajustó, con un  $R^2$  de 0.995 y un IDE del 79.50%, mostrando una alta dependencia espacial de las mazorcas enfermas durante este mes.

**Tabla 3**

*Parámetros de ajuste del semivariograma para la producción de mazorcas enfermas de cacao CCN-51*

Mes	Nugget	Sill	Rango (m)	Modelo	RMSE	$R^2$	IDE (%)	Grado de dependencia
Marzo	2990000	15760000	86.50	Esférico	$8.01 \times 10^{11}$	0.98	81.03	ALTA
Abril	678683.13	678683.13	222.65	Lineal	$9.66 \times 10^{10}$	0.88	0.00	BAJA
Mayo	2290000	19440000	144.40	Esférico	$5.45 \times 10^{11}$	0.99	88.22	ALTA
Junio	37500000	183000000	138.56	Gaussiano	$5.13 \times 10^{13}$	0.99	79.51	ALTA

RMSE = menor error cuadrático medio,  $R^2$  = coeficiente de determinación, IDE = índice de dependencia espacial

La Tabla 4 presenta los parámetros de ajuste del semivariograma para la producción de cacao seco CCN-51 por hectárea. En todos los meses evaluados, se observa que el modelo gaussiano proporciona el mejor ajuste para marzo, abril y mayo, mientras que el modelo esférico es el más adecuado para junio. Los valores de RMSE varían considerablemente, siendo mayo el mes con el menor RMSE, lo que indica una mayor precisión del modelo en este mes. Los valores de  $R^2$  se mantienen altos, superiores a 0.90 en todos los casos, lo cual demuestra una buena capacidad predictiva de los modelos utilizados. Además, los IDE son altos en todos los meses, reflejando un grado de dependencia espacial ALTA en la producción de cacao seco por hectárea.

**Tabla 4**

*Parámetros de ajuste del semivariograma para la producción de cacao CCN-51 seco por hectárea*

Mes	Nugget	Sill	Rango (m)	Modelo	RMSE	$R^2$	IDE (%)	Grado de dependencia
Marzo	15100	101300	200.57	Gaussiano	$9.92 \times 10^7$	0.97	85.09	ALTA
Abril	14900	240800	320.08	Gaussiano	$1.30 \times 10^9$	0.96	93.81	ALTA
Mayo	8100	57300	224.65	Gaussiano	7134340	0.99	85.86	ALTA
Junio	2790	19930	87.50	Esférico	6435133	0.92	86.00	ALTA

RMSE = menor error cuadrático medio,  $R^2$  = coeficiente de determinación, IDE = índice de dependencia espacial

Los resultados de este estudio están en concordancia con los hallazgos de Furtado y Oliveira (2019) y Cárdenas Pardo et al. (2017), quienes también realizaron un mapeo de enfermedades en el cultivo de cacao. En sus investigaciones, observaron una alta variabilidad espacial en la distribución de las enfermedades, lo cual coincide con nuestros resultados. Asimismo, ambos estudios identificaron que el modelo esférico y Gaussiano fueron los más adecuados para describir la dependencia espacial de enfermedades en cacao. Además, tanto en el estudio de Furtado y Oliveira como en el presente trabajo, se observó que, en ciertos meses, a pesar de un alto nivel de infestación, no se registró una dependencia espacial marcada, evidenciando una distribución aleatoria de la enfermedad.

La variabilidad dentro de los cultivos frutícolas, como los cítricos, fue documentada en los estudios de Molin et al. (2012) y Furtado y Oliveira (2019), quienes identificaron una marcada variabilidad espacial, lo que permite a los productores ubicar con precisión las zonas de mayor y menor productividad. En sus investigaciones, los semivariogramas que mejor se ajustaron a la producción de cítricos fueron principalmente los modelos esférico y gaussiano. Estos hallazgos son consistentes con los resultados de nuestro estudio, ya que se observó una variabilidad espacial similar en el cultivo de cacao, y los mismos modelos de semivariograma resultaron ser los más adecuados para describir esta variabilidad.

Al comparar los resultados de producción de cacao de este estudio con los obtenidos por Furtado y Oliveira (2019), se observan algunas similitudes y diferencias en cuanto a los modelos de semivariograma empleados. En nuestro estudio, el modelo gaussiano mostró una mayor consistencia al ajustarse mejor en la mayoría de los meses analizados, mientras que, en el trabajo de Furtado, los modelos esférico y gaussiano resultaron más adecuados para las plantaciones a pleno sol y los sistemas agroforestales, respectivamente. Estas diferencias pueden deberse a las características particulares de cada sistema de plantación y a los parámetros específicos evaluados en cada investigación. Mientras que el estudio de Furtado realizó un análisis específico para cada tipo de sistema de plantación, nuestro estudio evaluó la producción de cacao en diferentes meses, sin segmentación según el sistema de cultivo.

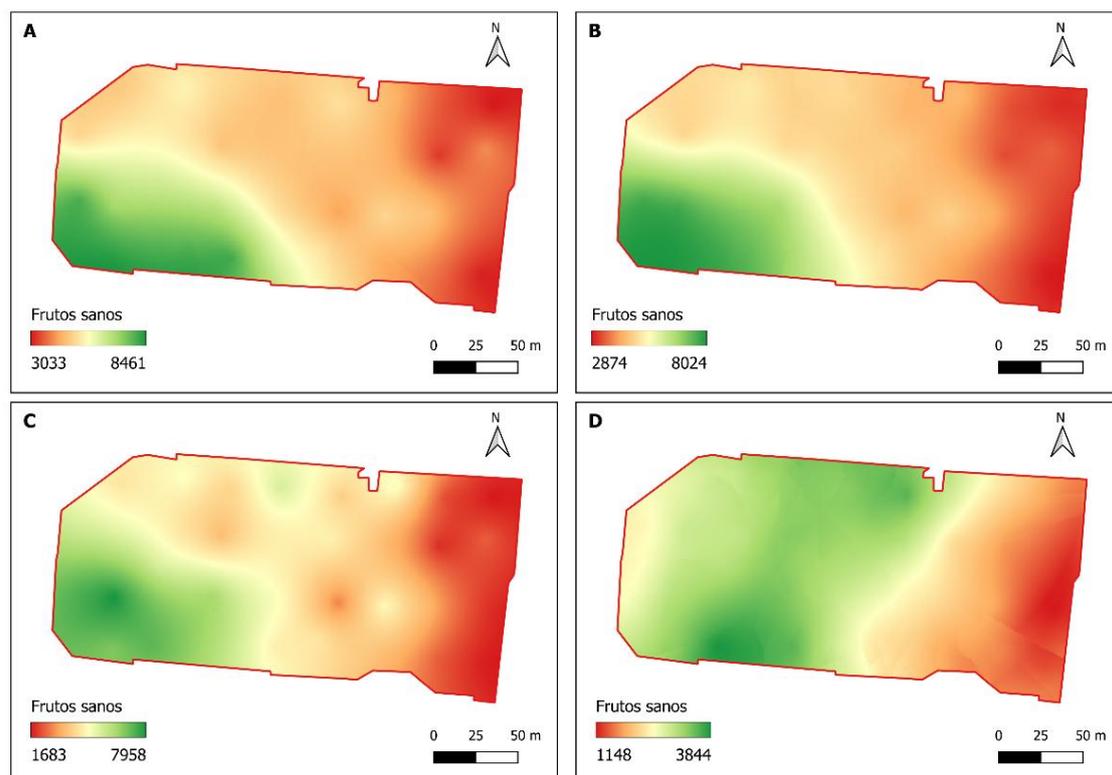
### **Interpolación usando Kriging**

Los resultados del procedimiento de interpolación indicaron que el kriging podría interpolar la cantidad mazorcas enfermas. Durante el primer mes de cosecha, marzo, se registró un 18 % de la superficie con la mayor producción de mazorcas sanas por hectárea, concentrada en la zona suroeste del área de estudio (Figura 2A). En abril, el porcentaje de superficie con altos niveles de producción de mazorcas sanas por hectárea fue del 15%, localizado igualmente en el suroeste (Figura 2B). En mayo, esta área representó un 13% de la superficie con producciones altas de mazorcas sanas por hectárea, manteniéndose en la zona suroeste (Figura 2C). Finalmente, en junio, último mes de cosecha, un 51% de

la superficie alcanzó la mayor producción de mazorcas sanas por hectárea, ubicándose principalmente en la zona oeste del área de estudio (Figura 2D).

**Figura 2**

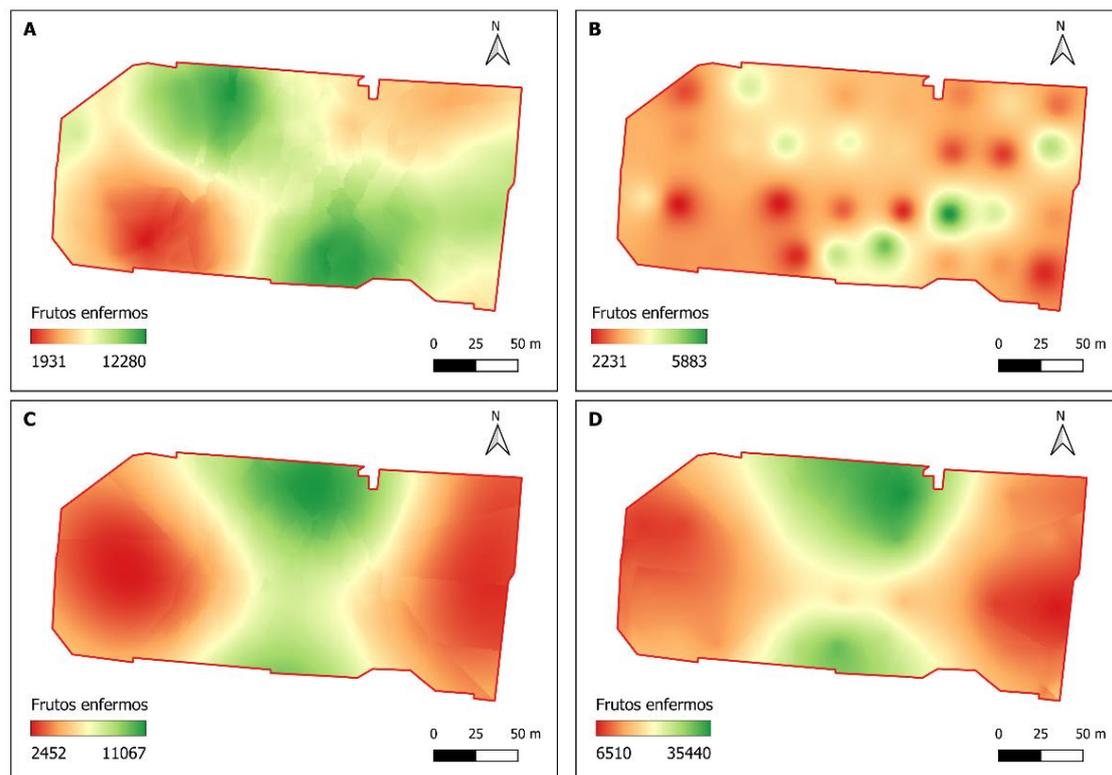
*Mapas interpolados de mazorcas sanas en la plantación de cacao para los meses de marzo(A), abril (B), mayo(C) y junio (D).*



Los resultados del proceso de interpolación mostraron que el método de kriging fue efectivo para estimar la cantidad de mazorcas enfermas, siendo aplicable únicamente en los meses de marzo, mayo y junio. Durante el primer mes de cosecha, marzo, se observó que un 44% de la superficie presentó la mayor cantidad de mazorcas enfermas, concentradas en el suroeste del área de estudio (Figura 3A). En el mes de abril, la interpolación se realizó mediante el método IDW, debido a la ausencia de dependencia espacial, los resultados muestran que el 18% de la superficie del área de estudio presentó las mayores concentraciones de frutos afectados, distribuidos de manera dispersa en el área de estudio (Figura 3B). En mayo, el 37% de la superficie del área de estudio presentó las mayores concentraciones de frutos enfermos, concentrándose principalmente en la zona central del área de estudio. (Figura 3C). Finalmente, para el mes de junio, el 42% de la superficie del área de estudio presentó las mayores concentraciones de frutos enfermos, concentrándose principalmente en la zona central (Figura 3D).

**Figura 3**

*Mapas interpolados de mazorcas enfermas en la plantación de cacao para los meses de marzo(A), abril (B), mayo(C) y junio (D).*



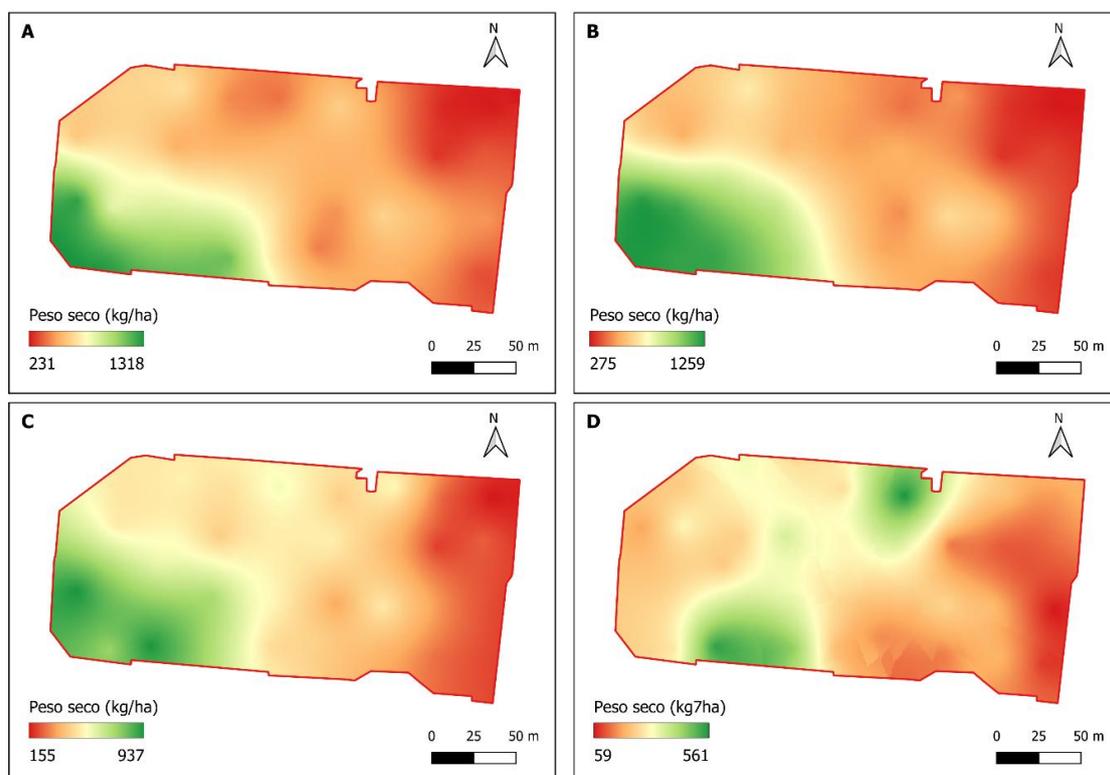
Los resultados del proceso de interpolación mostraron que el método de kriging fue capaz de estimar el rendimiento de cacao seco por hectárea durante todos los meses que duró el estudio. El mes de marzo, primer mes de cosecha, se presentó un 25% de la superficie con la mayor producción de cacao seco, principalmente en la parte suroeste del área de estudio (Figura 4A), en el mes de abril, se presentó aproximadamente el 30% de la superficie con la producción más alta de cacao seco en la parte suroeste (Figura 4B), el mes de mayo se presentó un 27% de la superficie con los valores más altos de cacao seco en la parte suroeste (Figura 4C) y el mes de junio último mes de cosecha se observa que aproximadamente el 23% de la superficie alcanzó los valores más altos de peso seco, principalmente en las zonas centrales del área de estudio (Figura 4D). En contraste, las áreas con menores valores de peso seco se concentraron en la parte este.

La variabilidad tanto para frutos enfermos, así como para frutos sanos que se ve reflejado en la producción sugiere diferencias en las condiciones de manejo de enfermedades, ya que al ser un cultivo con enfoque convencional tiene una rápida propagación de plagas (Okumura et al., 2014). Esta investigación corroboró la existencia de múltiples focos de infección y un aumento en los valores de incidencia de enfermedades a lo largo del

tiempo, concordando con Cárdenas Pardo et al. (2017). En particular, los rangos de dependencia espacial observados variaron entre 86.5 y 144.4 m en los meses de estudio, lo cual representa distancias mayores a las reportadas por Cárdenas Pardo et al. (2017) y Ten Hoopen et al. (2009). Esta diferencia puede estar asociada a las características específicas de los clones utilizados en cada estudio, que presentan distintos niveles de resistencia.

**Figura 4**

*Mapas interpolados de peso seco de cacao para los meses de marzo(A), abril (B), mayo(C) y junio (D).*



Los resultados obtenidos confirman que el clon CCN-51, utilizado en nuestra investigación, presenta susceptibilidad a *Phytophthora* spp. y resistencia a *Moniliophthora roreri*, como se evidenció en el aumento progresivo de la susceptibilidad a enfermedades a lo largo del estudio. Este comportamiento podría haber sido influenciado por las condiciones agroclimáticas prevalentes durante el período de investigación, caracterizadas por una alta humedad relativa y precipitaciones constantes, las cuales favorecieron la proliferación de *Phytophthora* spp. Este hallazgo está en concordancia con los resultados reportados en estudios previos, como los de Cabi (2021) y Cárdenas Pardo et al. (2017), que también identificaron la influencia de estos factores en la prevalencia de la enfermedad.

La edad es otra característica relevante en el sistema productivo, ya que tanto la cantidad de frutos como la incidencia de frutos enfermos aumentan a medida que las plantaciones envejecen. En particular, se ha observado que, en plantaciones de entre 4.4 y 8.7 años, la incidencia de enfermedades en los frutos incrementa significativamente, rango de edad que coincide con el de las plantas empleadas en esta investigación (Ramírez Gil, 2016).

#### 4. Conclusiones

- La producción de mazorcas sanas disminuyó significativamente a lo largo del periodo de estudio, con el promedio más bajo en junio, mientras que la cantidad de mazorcas enfermas aumentó, especialmente en los últimos meses. Esto resalta la influencia de condiciones ambientales favorables para el desarrollo de patógenos que afectaron la salud del cultivo de cacao CCN-51.
- Los modelos de semivariograma esférico y gaussiano fueron efectivos para capturar la estructura espacial de las mazorcas sanas, enfermas y el rendimiento de cacao seco, con variaciones mensuales en el ajuste de los modelos. Estos resultados indican una alta dependencia espacial en la distribución de las enfermedades y la productividad en el cultivo.
- La interpolación mediante kriging demostró ser una herramienta útil para estimar la variabilidad espacial del rendimiento y la distribución de mazorcas sanas y enfermas en el área de estudio. Este enfoque puede ayudar a identificar zonas de manejo específico y a optimizar las prácticas de control de enfermedades en plantaciones de cacao, minimizando así el impacto de patógenos en la producción.

#### 5. Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses en relación con el artículo presentado.

#### 6. Declaración de contribución de los autores

Todos autores contribuyeron significativamente en la elaboración del artículo.

#### 7. Costos de financiamiento

La presente investigación fue financiada en su totalidad con fondos propios de los autores.

#### 8. Referencias Bibliográficas

Anzules-Toala, V., Pazmiño-Bonilla, E., Alvarado-Huamán, L., Borjas-Ventura, R., Castro-Cepero, V., & Julca-Otiniano, A. (2021). Control of cacao (*Theobroma cacao*) diseases in Santo Domingo de los Tsachilas, Ecuador. *Agronomía Mesoamericana*, 33(1), 45939. <https://doi.org/10.15517/am.v33i1.45939>

- Cabi. (2021). *Phytophthora megakarya (black pod of cocoa)*. CABI Digital Library. <https://doi.org/10.1079/cabicompendum.40979>
- Cárdenas Pardo, N. J., Darghan Contreras, A. E., Sosa Rico, M. D., & Rodríguez, A. (2017). Análisis espacial de la incidencia de enfermedades en diferentes genotipos de cacao (*Theobroma cacao* L.) en El Yopal (Casanare), Colombia. *Acta Biológica Colombiana*, 22(2), 209–220. <https://doi.org/10.15446/abc.v22n2.61161>
- Colaço, A. F., Trevisan, R. G., Karp, F. H. S., & Molin, J. P. (2020). Yield mapping methods for manually harvested crops. *Computers and Electronics in Agriculture*, 177, 105693. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105693>
- Cubillos, G. (2023). Model of cultural control of the cacao frosty pod rot disease (*Monilophthora roleri* (CIF & Par) Evans et al.). *Horticulture International Journal*, 7(1), 6–7. <https://doi.org/10.15406/hij.2023.07.00268>
- Albores Flores, V., Gómez Rodríguez, L., López García, J. A., & Grajales Conesa, J. (2022). Mecanismos de infección endógena en frutos de cacao con *Monilophthora roleri*. *Polibotánica*, 1(53), 197-209. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.53.13>
- Furtado, D. C., & Oliveira, F. C. D. de. (2019). *Distribuição espacial da produtividade e fatores fitossanitários de cacauzeiros na Amazônia Oriental*. UFRA. <https://bdta.ufra.edu.br/jspui/handle/123456789/1447>
- Hammam, A. A., Mohamed, W. S., Sayed, S. E.-E., Kucher, D. E., & Mohamed, E. S. (2022). Assessment of Soil Contamination Using GIS and Multi-Variate Analysis: A Case Study in El-Minia Governorate, Egypt. *Agronomy*, 12(5), 1197. <https://doi.org/10.3390/agronomy12051197>
- Kumar, G. R., Challur, G., & Tammana, P. B. (2022). Machine learning techniques for crop yield prediction in indian agriculture. *International Journal of Scientific Development and Research*, 7(11), 475–482. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:254587884>
- Molin, J. P., Colaço, A. F., Carlos, E. F., & Mattos Junior, D. de. (2012). Yield mapping, soil fertility and tree gaps in an orange orchard. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 34(4), 1256–1265. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452012000400035>
- Molin, J. P., & Mascarin, L. S. (2007). Colheita de citros e obtenção de dados para mapeamento da produtividade. *Engenharia Agrícola*, 27(1), 259–266. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162007000100020>

- Okumura, M. H., de Tomi, G., & Passos, A. (2014). Geroferenced Pest Control Management in Brazilian Citrus Production. *Materials Science & Engineering*, 805, 429–434. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.805.429>
- Ota, T., Iwasaki, Y., Nakano, A., Kuribara, H., & Higashide, T. (2019). Development of yield and harvesting time monitoring system for tomato greenhouse production. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 12(1), 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2018.09.003>
- Pereira, G. W., Valente, D. S. M., Queiroz, D. M. de, Coelho, A. L. de F., Costa, M. M., & Grift, T. (2022). Smart-Map: An Open-Source QGIS plugin for digital mapping using machine learning techniques and ordinary kriging. *Agronomy*, 12(6), 1350. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061350>
- Ramírez Gil, J. G. (2016). Pérdidas económicas asociadas a la pudrición de la mazorca del cacao causada por *Phytophthora* spp., y *Moniliophthora roreri* (Cif y Par Evans et al., en la hacienda Theobroma, Colombia. *Revista de Protección Vegetal*, 31(1), 42–49. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1010-27522016000100006](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1010-27522016000100006)
- Robertson, G. P. (2008). *GS+: Geostatistics for the Environmental Sciences* (10.0). Gamma Design Software, LLC. <https://www.softbooks.pl/gammadesign/files/download/gsplususerguide.pdf>
- Swan, A. (1998). Geostatistics for natural resources evaluation. *Geological Magazine*, 135(6), 819–842. <https://doi.org/10.1017/S0016756898631502>
- Talaat, F. M. (2023). Crop yield prediction algorithm (CYPA) in precision agriculture based on IoT techniques and climate changes. *Neural Computing and Applications*, 35, 17281–17292. <https://doi.org/10.1007/s00521-023-08619-5>
- Ten Hoopen, G., Sounigo, O., Babin, R., Yede, & Cilas, C. (2009). Spatial and temporal analysis of a *Phytophthora megakarya* epidemic in a plantation in the centre region of Cameroon. *16th international cacao research conference*, 683–687. [https://publications.cirad.fr/une\\_notice.php?dk=554228](https://publications.cirad.fr/une_notice.php?dk=554228)
- Triboni, H. de R., & Barbosa, J. C. (2004). Estimativa do número de frutos por amostragem de parte da copa em laranjeiras. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 26(3), 454–458. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452004000300020>

El artículo que se publica es de exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento de la **Revista Ciencia Digital**.



El artículo queda en propiedad de la revista y, por tanto, su publicación parcial y/o total en otro medio tiene que ser autorizado por el director de la **Revista Ciencia Digital**.

